



特集記事 • 11

希少金属資源と省合金型鉄鋼材料開発の今

永久磁石の最新動向

The Latest Trend of the Permanent Magnet

徳原宏樹

Koki Tokuhara

日立金属(株) 磁性材料カンパニー
技術部長

1 はじめに

普段永久磁石を直接目にすることはほとんどないが、各種永久磁石が家電、情報機器、自動車、産業用モータ、風力発電など様々な分野で使用されており、要求される性能、価格や使用環境に合わせて永久磁石が使い分けられている。近年電子機器の小型・高性能化、省エネモータや自動車の燃費改善の要求がますます高まっており、モータの小型・軽量化のため、磁石材料に対する高性能化の要求は強い。また、自動車は電動化が進んでおり、電装モータに使用される磁石も増加しているため低価格化の要求も強い。今回各種永久磁石材料の高性能化と希少金属削減の動向について解説する。

2 フェライト磁石

フェライト磁石の最大エネルギー積は希土類磁石の10%程度と小さいが、酸化鉄を主成分とするため安価で化学的に安定であるため、家電および自動車の電装用モータ用途に広く使用されている。家電ではエアコンや冷蔵庫のコンプレッサが主な用途で、省エネの観点から高い残留磁束密度 (B_r) の要求が強い。自動車用途では、スタータ、パワーウィンド、サンルーフ、電動パワーステアリング (EPS: Electric Power Steerings) などに使用されており、燃費改善のため小型軽量化の要求が強く、また今後ますます電動化が進むことが予想され、残留磁束密度だけでなく高い保磁力 (H_{cJ}) を有するフェライト磁石の要求も強い。

一般的なフェライト磁石は六方晶系のマグネトプランバイト型結晶構造を有しており、材料組成は $AO \cdot 6Fe_2O_3$ (A元素はBaやSrなど) で表現される。1952年にPhilipsのWentによりA元素としてBaを用いたBaフェライト磁石が発明され¹⁾、その後1963年にBaをSrに置き換えたSrフェライト磁石がWestinghouseのCochardらにより実用化された²⁾。近年に

なって、SrやFeの一部を希土類元素であるLaやCoで置換したSr-La-Co系M型フェライトで、飽和磁化と磁気異方性が向上することが発見された^{3,4)}。小林らはA元素をSr以外のアルカリ土類金属で詳細に検討した結果、アルカリ土類金属をCaとしたときに更に飽和磁化と磁気異方性が向上することを見出し⁵⁾、Ca-La-Co系M型フェライト (NMF-12シリーズ) を工業化した。図1に実用化されている各種フェライト磁石の特性マップを示す。NMF-15シリーズはNMF-12シリーズの組成とプロセスを改良した高性能フェライト磁石である。

フェライト磁石の保磁力は低温で減少するため、モータ設計においていわゆる低温減磁を考慮する必要がある。図2に各種フェライト磁石の保磁力の温度係数の比較を示す。Sr-La-Co系M型フェライト (NMF-9シリーズ) の温度係数は従来材よりも改善されており、Ca-La-Co系M型フェライト (NMF-12,15シリーズ) ではさらに改善されていることが判る。これらの磁石では室温で比較的保磁力が低い材料でも低温での保磁力が確保されるため、低温減磁体力に優れていると言える。

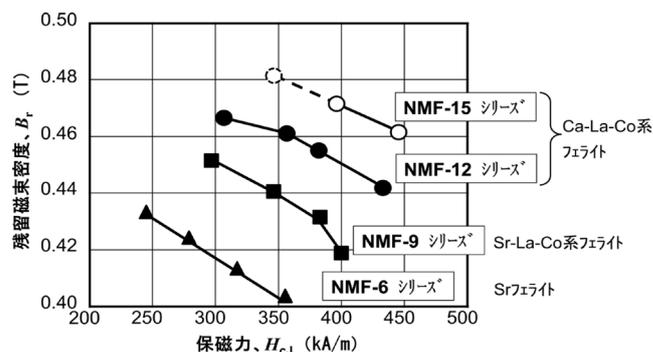


図1 各種フェライト磁石の特性マップ

出典: 日立金属(株)

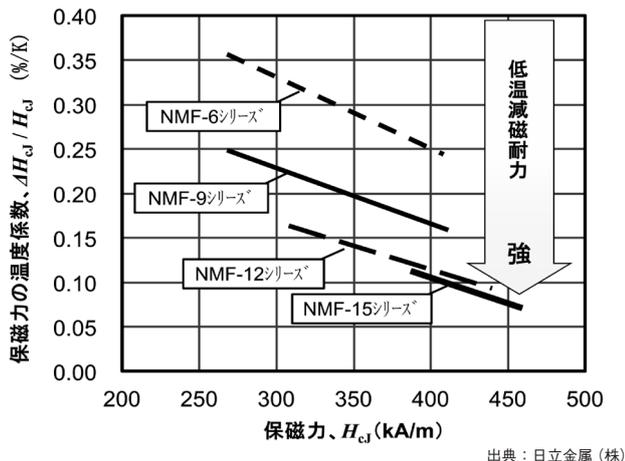


図2 各種フェライト磁石の保磁力の温度係数

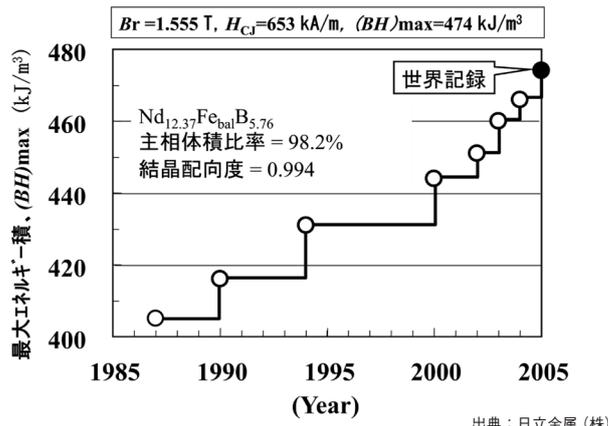


図3 NdFeB焼結磁石の最大エネルギー積の世界記録の変遷

3 NdFeB 焼結磁石

NdFeB焼結磁石は1982年に佐川らにより発明された⁶⁾。1985年に量産が開始されたが当時の最大エネルギー積は280 kJ/m³であった。また保磁力の温度依存性が大きく高温で減磁が発生するため、民生機器やボイスコイルモータ (VCM : Voice Coil Motor) など比較的使用温度の低い用途に限定され使用されていた。高温での減磁を解決するため採用されたのが、Nd (ネオジウム) の一部をDy (ジスプロシウム) で置換する手法であった。この磁石の主相であるNd₂Fe₁₄B化合物のNdの一部をDyに置き換えることにより、異方性磁界 (H_A) を高めることができ、室温における保磁力を高めることで高温における保磁力を確保する方法である。しかし、この手法ではDyの磁気モーメントがFeと反平行となるため、Dy置換量に応じて直線的に残留磁束密度が低下してしまうジレンマがあった。

NdFeB焼結磁石の残留磁束密度は、主相の飽和磁化 (J_s)、主相の体積比率 (f) と主相の配向度 (A) を用いて、B_r = J_s × f × A で表される。ここで飽和磁化 (J_s) は化合物固有の値であるため、残留磁束密度を高めるためには、主相の体積比率 (f) と主相の配向度 (A) を高める必要があり盛んに研究が行われた。主相の体積比率 (f) を高めるためには、出発合金の組成をNd₂Fe₁₄Bの化学量論組成にできるだけ近づける必要があり、言い換えると焼結に必要な液相を必要最小限まで削減する必要があった。しかしながら、当時の出発合金はインゴット (ブックモールド) で冷却速度が遅いため、インゴット内部に初晶のα-Feが析出し、微粉碎性を著しく悪化させた。その対策として長時間の溶体化処理を必要とした。その後、出発合金としてストリップキャスト (Strip Casting) 法が開発・量産化され、α-Fe問題はほぼ解決することができた。主相の体積比率 (f) を高めるもう一つの手法が酸素など

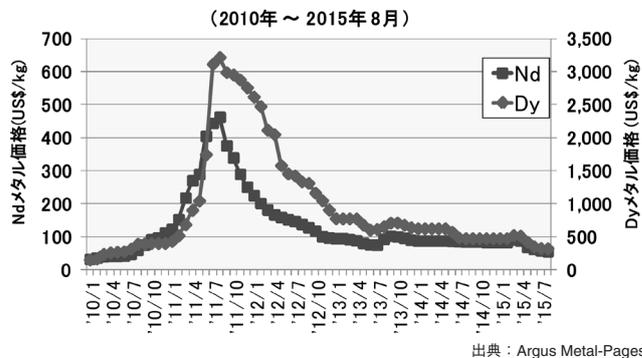
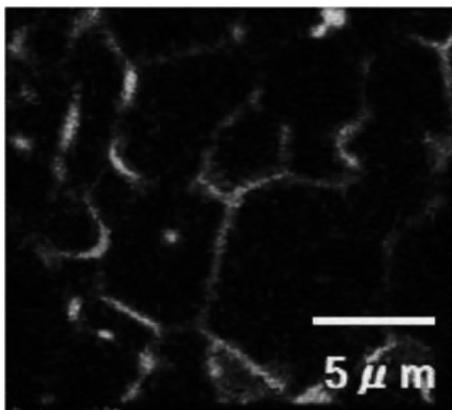


図4 希土類メタルの価格推移

の不純物の低減である。Ndは活性で酸素などと結合しやすいため、焼結磁石中でNd酸化物として存在し、結果として主相の体積比率 (f) を低下させる。粉碎工程から焼結工程まで原料粉末を酸化させないプロセスを構築し不純物の低減が図られた。一方主相の配向度 (A) の改善に関しては、微粉碎粉の粒度分布の改善やさまざまな潤滑剤の添加が検討され高残留磁束密度化が進んでいった。図3にNdFeB焼結磁石における最大エネルギー積の世界記録の変遷を示す。前述の高B_r化の改善により、2005年に474 kJ/m³ (B_r = 1.555 T) が記録され⁷⁾、現在もその記録は破られていない。言い換えるとNdFeB焼結磁石の高B_r化は、実験室レベルでは限界に達しているといえる。

一方希土類原料はそのほとんどが中国で生産され、輸出枠制限や輸出税の賦課により年々その価格は上昇した。2010年9月におきた尖閣諸島沖の中国漁船拿捕事件を発端に中国からの希土類原料の輸出が滞り、希土類原料価格の高騰が起こった。これを機に米国や豪州などで希土類鉱山の開発が進んだが、産出されるのはNd、La、Ceなどの軽希土類がメインで、DyやTbなどの重希土類は依然中国に依存したままである。図4に希土類メタルの価格推移を示す。急騰した希土



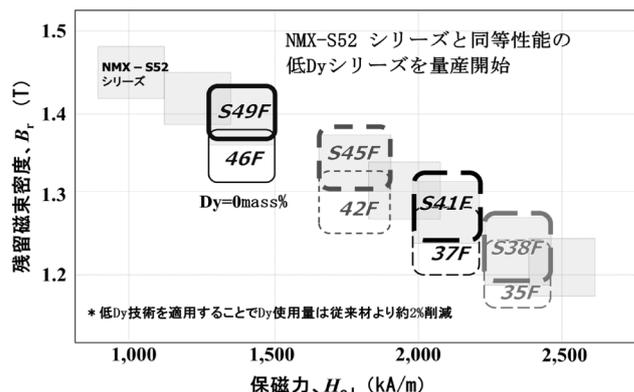
出典：日立金属（株）Magnet Product Guide, No HG-A26-G, (2012)

図5 Dy粒界拡散材のDy特性X線の強度分布

類メタル価格は2011年以降下落に転じ、米国、EU、日本が提訴したWTO (World Trade Organization) の裁定により、輸出枠が2015年1月に、また輸出税が2015年5月に撤廃され、その価格は安定してきた。繰り返しになるが、NdFeB焼結磁石の保磁力に有効な元素であるDyとTbは、依然中国に依存しており、また埋蔵量も限られているため、今後電気自動車 (EV: Electric Vehicle) など高い保磁力が要求される需要が増加すると、資源的・価格のリスクが懸念されるため、省重希土類の技術開発が加速した。

省重希土類技術として開発された一つが粒界拡散技術である。この技術は焼結後に、焼結体の表面から少量の重希土類元素を粒界拡散させるもので、主相の外郭のみに重希土類を濃縮させ、残留磁束密度の低下なしに保磁力を効果的に向上させる技術である。図5にEPMA (Electron Probe MicroAnalyser) で撮影したDy粒界拡散により作製された磁石のDyの特性X線の強度分布を示す。ここで白色に見える部分はDy濃度が高いことを示しており、主相であるNd₂Fe₁₄B相の外郭のDy濃度が高くなっていることが判る。この技術は、主相の外郭だけ異方性磁界 (H_A) を高めることで高保磁力が得られ、前述の残留磁束密度が低下するジレンマを打破した画期的な技術である。

また、近年粒界拡散を使用することなく重希土類を削減する技術が開発された。磁石組成と製造プロセスを見直すことにより、二粒子粒界相の厚みと磁性を制御することによりDy使用量削減が可能になっている。図6に低Dyシリーズの特性マップを示す。S49F、46FはDyフリー (Dy=0mass%) 材であり、その他の材質は本技術をベースにDyを添加させたものであるが、従来材に対してDy使用量を約2mass%削減できている。今後Dyフリーでどこまで保磁力を高めることができるかが、重要な課題である。



出典：日立金属（株）

図6 低Dyシリーズの特性マップ

4 NdFeB熱間加工磁石

NdFeB系の等方性液体急冷粉の圧粉体を熱間押し出しすることで異方性磁石 (MQ3) が量産されている。その微細な結晶粒から、焼結磁石に比べて高い保磁力が得られる。この熱間加工磁石の結晶粒径は一般的な焼結NdFeB磁石の1/20程度であるが、その微細な結晶粒径から期待される保磁力は得られていなかった。近年、この熱間加工磁石へのNd₇₀Cu₃₀共晶合金拡散法が開発され、保磁力を飛躍的に高めることが可能となった⁸⁾。しかしながら、非磁性相の割合が増加し、残留磁束密度が著しく低下する問題を抱えていた。さらに共晶合金拡散処理時の体積膨張を治具によって抑制し残留磁束密度の低下を最小限に抑制する膨張拘束共晶合金拡散法が開発され⁹⁾、その保磁力はDyを5mass%含有するNdFeB焼結磁石に匹敵する。

5 SmCo磁石

SmCo磁石はキュリー温度が高く、高温での残留磁束密度 (B_r) の安定性に優れた磁石であるが、SmはNdに比べて資源的に埋蔵量が少なく、また主成分であるCoも価格面でリスクがある。堀内らは2-17系SmCo磁石の鉄濃度に着目した研究を進め、鉄濃度を20~25mass%に増加 (Coを削減) させることにより磁化を増加させるだけでなく、製造プロセスの改善により保磁力を増加させ、最大エネルギー積 (室温) 280 kJ/m³を達成した¹⁰⁾。この技術を用いたSmCo磁石が鉄道の車両用のモータに採用されている¹¹⁾。

6 おわりに

永久磁石には今回紹介しなかった各種ボンド磁石もあるが、それぞれの特徴を生かした住み分けが行われている。資

源問題に関しては、フェライト磁石も希土類元素Laを使用しているが、Nd、Pr、Laなどの軽希土類に関しては資源の極集中が回避されたといえる。最近では、NdFe₁₂N系化合物などFe濃度の高い省希土類化合物の探索が盛んに行われており¹²⁾、新磁石への応用が期待されている。

参考文献

- 1) J.J.Went, G.W.Rathenau, E.W.Groter and G.W.van Oosterhout : Philips Tech.Rev., 13, (1952), 194.
- 2) A.Cochardt : J.Apply.Phys., 34., (1963), 1273.
- 3) 田口仁, 武井卓, 諏訪健一郎 : 日本磁気学会誌, 21, (1997), 901.
- 4) Y.Ogata, Y.kubota, T.Takami, M.Tokunaga and T.Shinohara : IEEE Trans.Magn., 35 (1999), 3334.
- 5) Y.Kobayashi, S.Hosokawa, E.Oda and S.Toyota : J.Jpn. Soc.Powder Metallurgy, 55 (2008), 541.
- 6) M.Sagawa, S.Fujimura, N.Togawa, H.Yamamoto and Y.Matsuura : J. Appl.Phys., 55 (1984), 2083.
- 7) Y.Matsuura : J.Magn.Magn.Mater., 303 (2006), 344.
- 8) H.Sepehri-Amin, T.Ohkubo, S.Nagashima, M.Yano, T.Shoji, A.Kato, T.Schrefl and K.Hono : Acta Mater., 61 (2013), 6622.
- 9) T.Akiya, J.Liu, H.Sepehri-Amin, T.Ohkubo, K.Hioki, A.Hattori and K.Hono : J.Appl.Phys., 115 (2014), 17A766.
- 10) 堀内陽介 : ジスプロシウムを使用しないモータ用高鉄濃度サマリウムコバルト磁石, 東芝レビュー, 68 (2013) 6, 56.
- 11) JR九州新型車量向駆動システムの受注について, 東芝プレスリリース, 東芝, (2014.9.3)
- 12) Y.Hirayama, Y.Takahashi, S.Hirosawa and K.Hono : Scr.Mater., 95 (2015), 70.

(2015年8月28日受付)